

급류수로 터널에서의 Cavitation의 문제와 대책방안

김성인^{*1}, 김재관^{*2}

1. 개요

주행속도가 300km/h에 육박하는 고속철도가 터널 안으로 진입하게 되면 터널내의 공기흐름에 영향을 미치게 되어 터널벽체에 공기압이 작용하게 된다. 따라서 일반도로나 철도에서의 터널설계와는 달리 고속철도용 터널설계에서는 공기압에 대한 검토를 별도로 하는 것이 일반적이다.

이와 마찬가지로 수로터널의 경우, 터널 내에 물이 빠르게 흐르는 경우에는 저유속 수로터널과는 달리 특별한 문제가 발생될 것이라고 추측할 수 있다.

물의 흐름속도가 어느 한계 이상이 되면 흐름 내에서는 공기방울이 발생하는데, 이 공기방울이 매우 빠른 속도로 이동하면서 터널벽체나 하부에 부딪히게 된다. 이때 공기방울이 파쇄되면서 터널라이닝에 손상을 주게 되는데 이것을 캐비테이션에 의한 손상(Cavitation Damage)이라고 한다.

터널내의 물의 흐름이 빠르게 유지되는 사례는 일반적으로 발전을 위한 도수터널(Penstock Tunnel)과 터널형 여수로(Tunnel Spillway)에서 흔히 볼 수

있다. 도수터널의 경우 발전용 터빈을 회전시키기 위해 엄청난 속도의 물 흐름이 필요하며, 이때 캐비테이션에 의한 손상을 방지하기 위하여 터널의 라이닝은 수압철관을 이용하는 것이 일반적이다. 터널형 여수로의 경우, 국내에는 터널형 여수로가 없어 그 피해사례가 없지만 해외의 경우 콘크리트 라이닝으로 시공된 터널형 여수로에서는 많은 피해사례가 보고되고 있다.

2. 캐비테이션의 기본개념

2.1 캐비테이션의 정의

급류수로에서 발생하는 캐비테이션을 이해하기 위해서는 물이 끓는 과정을 먼저 이해하는 것이 도움이 된다. 물은 일반적인 조건에서는 100°C에서 물이 끓게 되며 이 온도를 물의 비등점이라고 표현한다. 물이 비등점에 도달하게 되면 물속에서는 공기방울이 발생된다.

그러나 높은 산위에서는 기압이 낮기 때문에 100°C 이하에서 물이 끓는다는 것은 경험을 통해서 알고 있다. 즉 비등점은 그 지점의 기압과 매우 밀접한 연관

*1 태조엔지니어링 상무

*2 SK건설 부장(jkkim-b@skec.co.kr)



이 있다는 것을 의미한다. 그림 1은 기압과 비등점과의 관계를 나타내는 그래프로 에베레스트산 정상에서는 물의 비등점이 60~70°C 정도임을 알 수 있다.

물의 흐름은 다음과 같은 Bernoulli 방정식에 지배를 받는다.

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma_w} + z = C \quad (1)$$

- 여기서, v : 흐름속도
- g : 중력가속도
- p : 압력
- z : 위치수두
- C : 상수

위의 방정식에서 보는 바와 같이 물이 흐를 때 어느 지점에서의 총수두(=속도수두+압력수두+위치수두)는 항상 일정해야 하므로 물의 속도가 매우 빠르게 되면 상대적으로 그 지점의 압력수두는 작아져야 한다. 따라서 이 지점에서의 압력이 급격하게 저하되었기 때문에 비등점이 낮아지게 되어 상온이지만 물이 끓는 현상처럼 공기방울이 발생하게 된다. 이처럼 물의 흐름내부에 공기방울이 발생하는 현상을 캐비테이션이라고 한다.

실생활에서 발견할 수 있는 캐비테이션의 또 다른 예는 탄산음료의 마개를 열었을 때이다. 마개를 따게 되면 병 속의 압력이 급격하게 저하되어 음료 안에 있는 탄산가스가 용해되면서 공기방울이 발생된다.

이와 같이 물의 흐름속도가 어느 한계치 이상이면 압력저하에 따라 공기방울이 발생되며 이 공기방울이 파쇄됨에 따라 터널의 라이닝이 붕괴될 수 있다. 국내 D전자의 공기방울 세탁기의 세탁원리도 이런 캐비테이션을 이용하는 것으로 공기방울이 터지면서 발생하는 힘을 이용해 옷감에 묻어 있는 오염물질을 씻

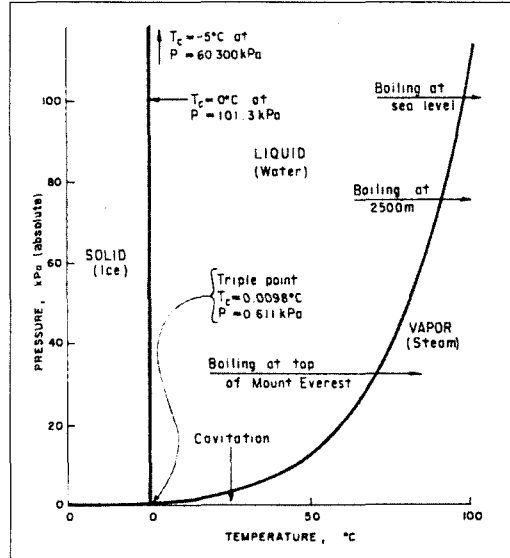


그림 1. 기압과 비등점의 관계도

어내는 원리라는 것을 감안하면 엄청난 속도로 이동된 공기방울이 터지면서 발생하는 힘에 의해 터널이 붕괴되는 것은 어느 정도 이해할 수 있다.

2.2 캐비테이션의 원인

1) 압력감소

앞에서 설명한 바와 같이 물의 흐름이 빨라질 때 그 지점의 압력이 감소되어 비등점에 도달하게 되면 공기방울이 발생한다. 이외에도 캐비테이션이 발생하는 원인은 몇 가지가 더 있다.

2) 불규칙한 표면

물의 흐름이 정상류가 아닌 와류(turbulence flow)가 형성될 때 캐비테이션이 발생된다. 흐름표면이 불규칙하게 되면 물의 흐름방향이 갑자기 변화하는데 이때 와류가 형성되면서 캐비테이션 현상이 일어난다.

3) 전단흐름(Shear Flow)

유체내부에 전단흐름이 있게 되면 캐비테이션을 일으킬 수 있다. 잠잠한 물속에 강한 수압의 분출류(Jet Flow)가 통과하게 되면 흐름내부에서 전단면이 형성된다. 전단면은 높은 속도의 분출류와 상대적으로 조용한 흐름사이에서 발생된다. 예를 들어 air jet 또는 water jet에 의해 발생된 전단면에서 공기방울이 형성된다.

2.3 급류수로에서의 캐비테이션 피해사례

1) Glen Canyon댐

Glen Canyon댐은 미국의 콜로라도강에 위치한 콘크리트 아치댐으로 그 높이가 216m이며 폭은 415m이다. 이 댐의 여수로로는 그림 2에서 보는 바와 같이 좌안 및 우안에 터널형 여수로가 설치되어 있다.

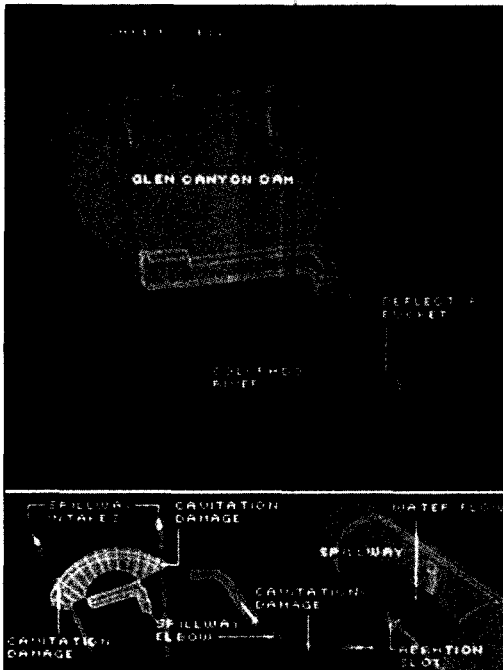


그림2. Glen Canyon댐에서 발생된 캐비테이션에 의한 손상

1983년 6월에 집중호우로 인해 약 560m³/s의 유량을 방류하였는데 터널형 여수로 내부에서 캐비테이션에 의한 손상이 발생되었다. 그 피해의 규모는 깊이 10m, 연장 54m에 걸쳐 대규모로 터널하부가 새굴되었는데, 결국 발생한 공동을 콘크리트로 매립하였으며 캐비테이션을 방지하기 위해 에어레이터(aerator)를 설치하게 되었다.

2) Karun댐

그림 3은 이란 카룬댐의 개수로형 여수로에서 발생된 캐비테이션에 의한 손상을 잘 보여주고 있다. 사진 속의 인플크기와 비교해보면 그 피해범위가 매우 광대하다는 것을 알 수 있다.

이밖에도 전세계적으로 발생된 캐비테이션에 의한 터널형 여수로의 손상을 조사한 자료는 표 1과 같다.



그림 3. Karun댐에서 발생된 캐비테이션에 의한 손상



표 1. 터널형 여수로에서 캐비테이션에 의한 피해사례

댐이름	위치	피해발생년도	터널직경(m)	터널경사(도)	낙차(m)	방류량(m ³ /s)	
						설계시	파괴시
Glen Canyon	Colorado USA	1983	12.5	55	174.8	3,900	910
Blue Mesa	Colorado USA	1970	6.4	55	101.3	963	99
Kortes	Wyoming USA	1983	9.1	50	60	1400	-
Yellowtail	Bighorn USA	1967	9.75	55	147.8	2605	425
Hoover	Colorado USA	1941	15.4	53	170.4	1076	366(아리조나측)
		1983				407	283(네바다측)
Sarrans	Truyere France	1935	8.0	28.8	73.8	1200	430
San Esteban	Sil Spain	1959	6.0	56	105	550	-
Infiernillo	Mexico	1964	13.0	50	120	3500	1000
Aldeadavila	Duero Spain	1966	-	-	120	2800	-

3. 캐비테이션에 영향을 미치는 요소

3.1 유속

흐름속도에 따른 캐비테이션 발생여부는 캐비테이션 지수(Cavitation Index)라는 개념을 이용하여 검토한다.

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\rho v^2 / 2} \quad (2)$$

여기서, σ : 캐비테이션 지수

P_o : 기준압력

P_v : 물의 증기압

v : 흐름속도

일반적으로 캐비테이션 지수가 3.0 이상이면 캐비테이션에 의한 영향이 전혀 없다고 고려하며 지수가 1.8이하이면 캐비테이션이 발생하기 시작한다고 가정한다. 또한 0.3(α 1.8인 경우에는 작은 물방울이 많이 발생하며 α 0.3이면 비교적 큰 물방울이 만들어진다.

미공병단(U.S. Army C.O.E)의 기준에 의하면 유속이 35ft/s(\approx 10m/s)이면 캐비테이션에 대한 검토를 해야 하며 100ft/s(\approx 30m/s)이상이면 캐비테이션에 의한 파손이 일어난다고 정의한 바 있다.

다음 그림 4는 캐비테이션에 의해 손상된 댐에서의 캐비테이션 지수와 방류시간과의 관계를 나타낸 도표이다. 대체적으로 파손된 여수로의 흐름속도는 30m/s를 초과하며 캐비테이션 지수는 0.2이하에서 발생되고 있음을 알 수 있다. 또한 동일한 캐비테이션 지수에서도 방류시간에 의해서도 영향을 받는다는 것을 보여주고 있다.

3.2 공기함유량

여러 학자들이 여러 가지 실험을 통해 유체내 공기 함유량이 캐비테이션 손상에 미치는 영향을 검토하였다. 실험결과 공기함유량이 적은 지점에서 손상이 많이 발생되며 공기함유량이 많은 경우에는 그 반대 결과를 얻을 수 있다는 것을 알게 되었다.

처음에는 공기가 유체와 터널라이닝사이에서 쿠션

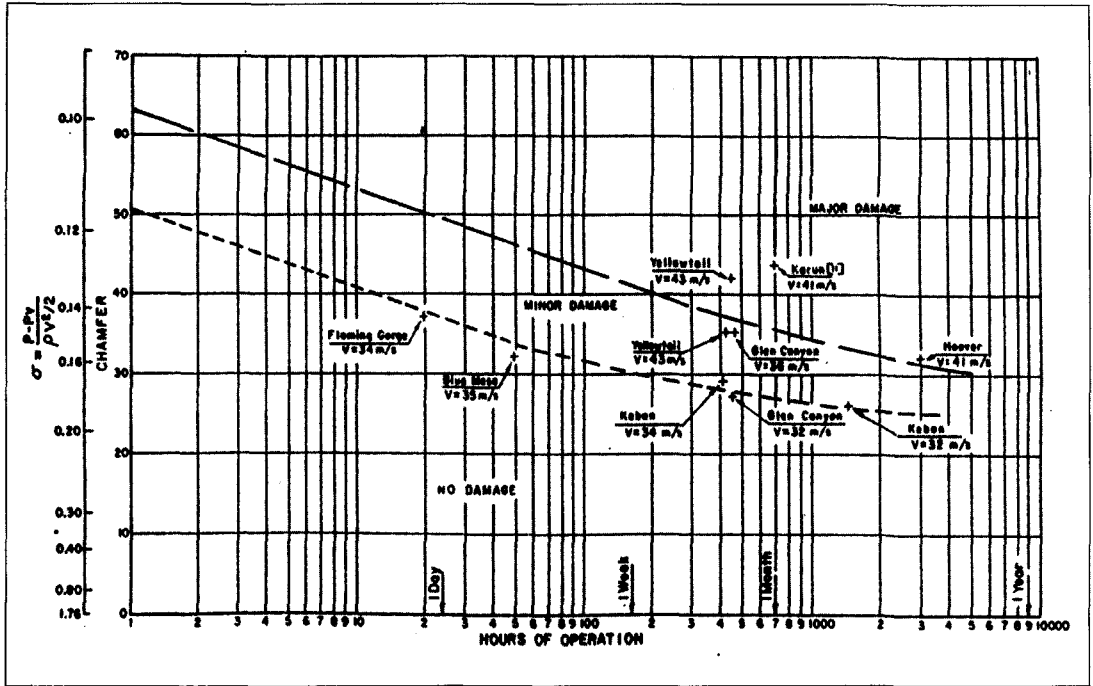


그림 4. 캐비테이션에 의한 손상사례

의 역할을 한다는 생각을 하였다. 공기가 유입되면 압력이 다소 높아질 것으로 기대하였기 때문이다. 그러나 그 원리는 맞지 않는다.

현재는 두 가지 이론으로 캐비테이션 손상을 방지하기 위한 aeration의 효과에 대해서 설명하고 있다. 첫 번째 이론은 유입된 공기의 비압축성 특성 때문에 붕괴과정을 지연시키거나 완충역할을 한다는 이론을 토대로 한 것이다. 두 번째 이론은 용해되지 않는 공기가 유체 내에 유입되면 파쇄되는 공기방울 주위의 흐름속도를 바꾸어 파쇄강도를 감소시킨다는 것이다.

3.3 라이닝 재료

캐비테이션에 의한 표면손상은 재료의 극한강도, 연성 및 균질성 등을 포함하여 여러 가지 요인에 의한

영향을 받는다. 공기방울이 파괴될 때 그 충격에 의한 표면변형은 재료내부에서 인장력을 발생시킨다. 따라서 인장강도는 압축강도와 전단강도와는 달리 매우 중요한 요소이다.

Colgate는 라이닝재료에 따른 캐비테이션의 손상 여부를 파악하기 위하여 모형실험을 실시하였다. 일반 콘크리트인 경우 30m/s의 흐름이 3시간 정도 지속되었을 때 캐비테이션에 의한 손상이 발생되었다. 동일한 흐름속도에서 폴리머 콘크리트에서 캐비테이션에 의한 손상이 발생하는데 걸리는 시간은 125시간이었으며 스테인레스 강일 경우에는 6,000시간이 필요하였다. 카본스틸(carbon steel)은 스테인레스강에 비해 1/7정도의 시간이 필요하며 알루미늄이나 동은 경우에는 1/25정도였다.



4. 캐비테이션 방지대책 - Aerator

4.1 에어레이터의 기능

앞에서 설명한 캐비테이션에 영향을 미치는 여러 가지 요소 중에 흐르는 물속에 공기가 주입되면 캐비테이션이 감소한다는 것을 설명한 바 있다.

Peterka는 28일강도가 17MPa인 콘크리트에서 손상을 방지하는데 필요한 공기의 양이 7.5%임을 실험을 통해 밝힌 바 있다. Semenkova와 Lentiaev는 라이닝 재료의 강도가 작을 경우 공기의 양을 증가시켜야 한다는 것을 밝힌 바 있는데 이 결과는 Peterka의 실험결과와 잘 일치된다. 이와 같이 흐르는 물에 강제로 공기를 주입, 혼합시킬 수 있도록 고안된 장치를 에어레이터(aerator)라고 한다.

댐 여수로에 에어레이터를 최초로 설치한 것은 1967년 미국의 Yellowtail 댐으로 에어레이터 설치 후, 몇 번의 큰 방류에도 잘 견디게 되었다. 아직 설계 유량에 해당되는 방류를 한 기록이 없기 때문에 에어레이터의 기능을 완전히 보장하지는 못하지만 이후 여수로에 에어레이터를 설치하는 것은 전세계적으로 보편화되었다.

4.2 에어레이터의 종류

그림 5는 에어레이터의 기본적인 종류를 나타낸 것으로 Deflector, Groove, Offset형과 이를 서로 조합한 형이 있다. 에어레이터의 목적은 물의 흐름을 바닥면으로부터 띄워서 공기가 흐름표면 아래로 쉽게 유입되도록 하는 개념이다. 이와 같은 방법을 적용하면 공기펌프와 같은 기계적인 방법을 사용하지 않아도 유체의 흐름 속으로 공기를 유입시킬 수 있다. 소단형(Offset)은 홈이 없이 평탄하므로 에어레이터가 침수

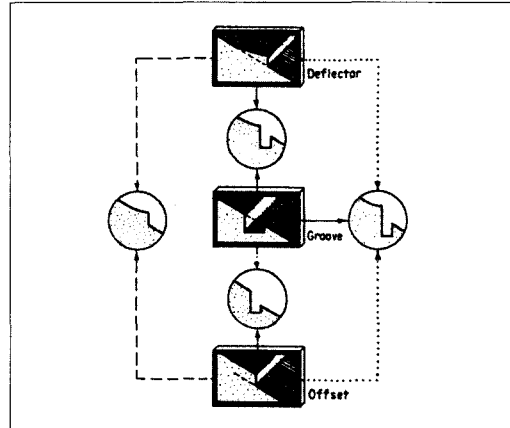


그림 5. 에어레이터의 종류

되는 것을 방지할 수 있다는 장점이 있다.

4.3 에어레이터의 위치

여수로는 캐비테이션 지수가 약 0.2 이하 보다 작은 경우에 손상된다는 것을 앞에서 설명한 바 있다. 캐비테이션 지수가 0.2 이상인 경우에는 약간의 손상이 발생되지만 일반적으로 손상의 범위는 보수를 필요로 하지는 않을 정도로 미미하다. 그러므로 설계관점에서 캐비테이션 지수가 0.2 이상인 경우에는 손상이 없는 안전한 것으로 판단한다.

그러나 유속이 매우 빠른 경우 캐비테이션 지수를 0.2 이상으로 유지하기 위해서는 에어레이터의 램프 높이를 더 높게 하는 경우가 있다. 램프높이가 커지게 되면 점프한 물이 터널의 천단부에 충돌하여 손상을 일으킬 수 있으며 개수로형 여수로인 경우에는 측벽 넘어로 월류할 수 있다. 따라서 에어레이터를 설치할 때에는 램프에서의 물이 점프하는 여유고를 충분히 고려해야 하므로 터널 단면이 커지게 되는 단점이 있다.

이외에도 에어레이터의 위치를 선정할 때 위로 오목한 단면에 설치하는 것은 피하여야 한다. 그것은 공

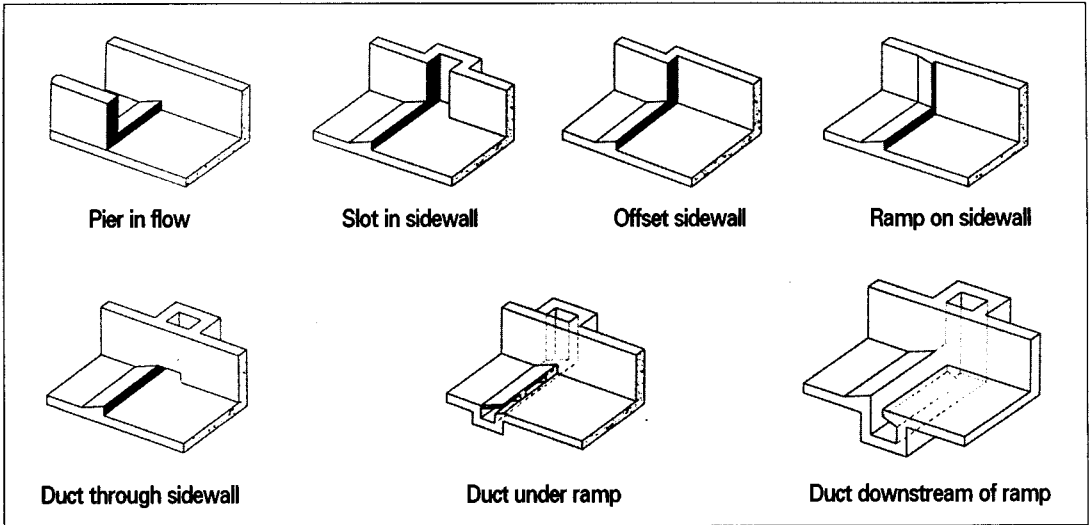


그림 6. Air Vent의 종류

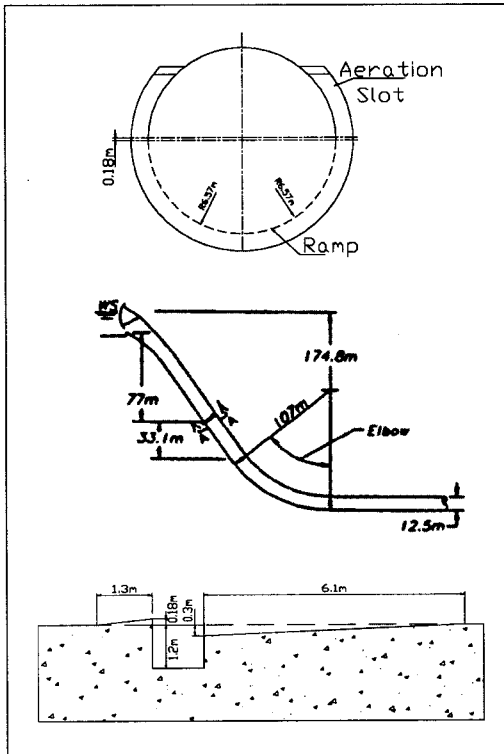


그림 7. Glen Canyon댐의 에어레이터

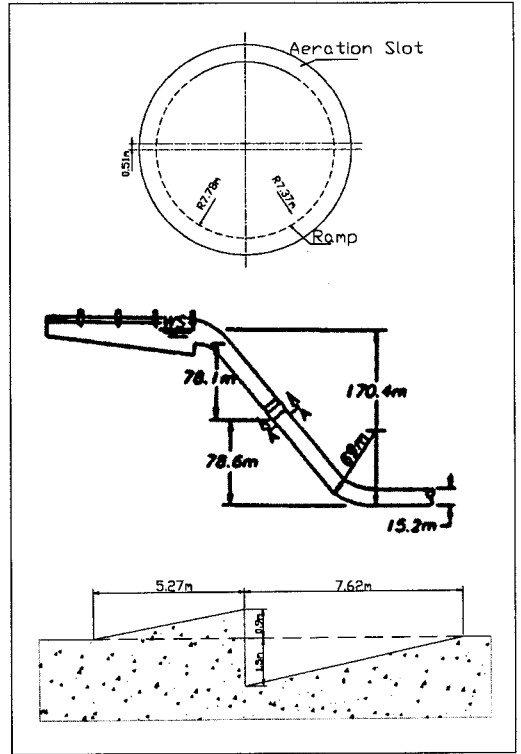


그림 8. Hoover댐의 에어레이터



기의 공급원이 되는 홈(Groove)에 물이 채워지게 되어 공기유입을 방해하기 때문이다.

4.4 Air Vent

연속적으로 물이 흐를 경우 에어레이터 홈에 잔류된 공기의 양이 충분하지 않아 에어레이터의 기능을 하지 못할 수가 있다. 이때에는 공기를 공급해줄 수 있는 시설을 별도로 준비하여야 하며 이것을 에어벤트(Air Vent)라 한다. 에어벤트는 그림 6과 같이 여러 가지 방법이 고안되어 있다.

일반적으로 여수로의 크기가 작은 경우에는 slot형을 많이 사용하며 여수로의 규모가 커서 에어레이터가 커져야할 경우에는 duct형을 적용하는 것이 일반적이다.

5. 급류수로 바닥면의 거칠기

앞에서 설명한 바와 같이 급류수로 바닥면이 거친 경우 캐비테이션이 발생하는 큰 원인이 될 수 있다.

미국의 기준에 따르면 표 2와 같이 흐름속도별로 거칠기의 한계기준이 확립되어 있다.

그러나 바닥면을 엄격한 시방규정에 따라 시공하더라도 물속의 자갈이나 모래가 이동하면서 바닥면을 손상시켜, 바닥면이 국부적으로 불규칙하게 되기 때문에 거칠기 규정과 일치하지 못하는 경우가 있다. 따라서 위와 같은 캐비테이션 손상을 방지하기 위한 정확한 허용기준치를 만족하기 위해서는 광범위한 유지

표 2. 흐름속도별 거칠기 한계

속도범위 (m/s)	마감정도(높이/깊이)
12-27	1/20
27-36	1/50
36이상	1/100

관리 프로그램이 준비되어야 한다.

6. 에어레이터 설치사례

그림 7 및 그림 8은 미국의 터널식 여수로에 설치된 에어레이터의 형식 및 설치위치에 대한 사례이다.

7. 맺음말

콘크리트 재료로 라이닝처리를 한 터널형 여수로나 개방형 여수로에서 매우 빠른 속도의 흐름이 발생하면 캐비테이션에 의한 손상이 발생한다. 이를 방지하기 위해 에어레이터를 설치하거나 캐비테이션이 발생되지 않도록 흐름속도를 조절해야 한다.

본고를 통해 도로나 철도 터널설계에 익숙한 터널 기술자들에게 생소한 급류수로에서 발생할 수 있는 캐비테이션의 문제와 대책방안을 소개함으로써 수로 터널의 설계에 작으나마 도움이 될 수 있었으면 하는 것이 저술자의 바람이다.

참고문헌

1. Henry T. Falvey(1990) "Cavitation in Chutes and Spillway", A water resources technical publication Engineering Monograph No.42, U.S Department of the Interior
2. U.S. Army Corp of Engineers(1992), Engineering and Design Hydraulic Design of Spillway(EM 1110-2-1603)
3. Rose(2003), Stepped Spillway Aerator